

Sedumtaks kolinlagringspotential på årsbasis

Yearly Carbon Sequestration Potential of Extensive Sedum Green Roofs

Sofie Taylor



Kandidatuppsats i miljövetenskap
Kandidatprogrammet – Biologi och markvetenskap

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för mark och miljö

Sofie Taylor

Sedumtaks kolinlagringspotential på årsbasis
Yearly Carbon Sequestration Potential of Extensive Sedum Green Roofs

Huvudhandledare: Carina Ortiz, institutionen för mark och miljö, SLU
Biträdande handledare: Monika Strömgren, institutionen för mark och miljö, SLU & Lina Pettersson, Veg Tech
Examinator: Annemieke Gärdenäs, institutionen för mark och miljö, SLU

EX0688, Självständigt arbete i miljövetenskap - kandidatarbete, 15 hp, Grundnivå, G2E
Kandidatprogrammet Biologi och miljövetenskap 180 hp

Serienamn: Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2015:08

Uppsala 2015

Nyckelord: koldioxid, klimatpåverkan, fotosyntes, ljusintensitet, urbanisering

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Omslag: Provytor med sedumarter. Foto författaren, 2014.

Tack

Jag vill inledningsvis passa på och tacka några personer som gjort denna uppsats möjlig. Först och främst vill jag tacka mina handledare Carina Ortiz och Monika Strömgren för hjälp med data, skrivandet av uppsatsen och stöd i hela uppsatsprocessen. Jag vill sedan rikta ett stort tack till Veg Tech och då främst Lina Pettersson som gjort denna studie möjlig med bidrag av sedummattor och utvecklande av frågeställning.

Sammanfattning

Ett av de stora miljöproblem samhället står inför idag är de ökade emissioner av växthusgaser, såsom koldioxid, som kommer av urbanisering. Det finns ett behov av innovativa lösningar för att lösa detta problem och den här studien syftar till att studera sedumtaks potential att lagra in kol på årsbasis och att bedöma om de kan bidra till minskad klimatpåverkan. Ytterligare syfte är att analysera hur lufttemperatur och substratets fuktighet påverkar koldioxidutbytet vid olika ljusnivåer. Sedumtaks potentiella årliga koldioxidupptag skattades från ljusresponsfunktioner som baserades på koldioxidutbytesmätningar av sedumtak i klimatkamrar och skalades upp till ett årsvärde med klimatdata över lufttemperatur och fotosyntetisk aktiv strålning (PAR) från Uppsala år 2013. Resultatet visade att sedumtak lagrar in $45 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$. I relation till tidigare studier om kolinlagring är mängden mindre, men vägs andra positiva aspekter in, exempelvis att sedumtak isolerar, vilket indirekt minskar utsläpp av växthusgaser, kan sedumtak vara en bra lösning i urbana miljöer. Det faktum att alternativen tegel-, plåt- och papptak har ett obefintligt netto-upptag av koldioxid visar sedumtaks potential att vara en bra lösning för att minska växthusgaser i urbana miljöer.

Nyckelord: Koldioxid, Klimatpåverkan, Ljusintensitet, Fotosyntes, Urbanisering

Abstract

One of the environmental issues facing today's society is the increased emission of greenhouse gases, such as carbon dioxide, from urbanization. There is a need of innovative solutions to that problem and this thesis aim to evaluate sedum green roofs ability to yearly carbon sequestration and evaluate if it could reduce the effect of urbanization on climate change.

Another aim is to analyse the impact of air temperature and the medium's moisture content on carbon sequestration at different light levels. The potential of sedum roofs to sequester carbon was estimated using light response functions established from carbon dioxide (CO₂) exchange measurements in climate chambers and scaled up to a yearly value using data of air temperature and photosynthetically active radiation (PAR) Uppsala 2013. The result showed that sedum roof sequesters 45 g C m⁻² year⁻¹. Put in relation to prior studies about carbon sequestration the amount is low, but if other positive aspect of sedum roof such as it's ability to isolate roof-tops, which indirect reduces the emissions of green house gases, is encountered it is a good solution for urban environments. The fact that the alternative roofs such as tile roof, felt roof and tin roof do not sequester any carbon dioxide shows sedum roofs potential of being a great solution to reduce greenhouse gases in urban areas.

Keywords: Carbon Dioxide, Climate Change, Light Intensity, Photosynthesis, Urbanization

Innehållsförteckning

1	Inledning	8
1.1	Fotosyntes	9
1.2	Nettofotosyntes av kol i sedumtak	11
1.3	Syftet	12
2	Metod och material	13
2.1	Utförande	13
2.2	Material för mätningar	15
	Beräkningar av koldioxidutbyte	15
2.2.1	Koncentrationsförändringen	15
2.2.2	Koldioxidflödet	16
2.2.3	Ljusresponskurvor	16
2.2.4	Koldioxidflödet på årsbasis	17
2.3	Sedumarternas och substratets kolinnehåll	17
3	Resultat	19
3.1	Sedummattornas kolinnehåll	19
3.2	Lufttemperaturens och markfuktighetens inverkan på koldioxidupptaget	19
3.3	Sedumtaks potentiella kolinlagring på årsbasis	23
4	Diskussion	24
	Antagandenas inverkan kolinlagringen på årsbasis	24
	Lufttemperaturens inverkan på koldioxidupptaget	25
	Markfuktighetens inverkan på koldioxidupptaget	25
	Kan sedumtak bidra till minskad klimatpåverkan?	26
	Förslag till vidare forskning	26
5	Slutsats	28
	Referenslista	29

1 Inledning

Ett miljöproblem idag är urbanisering. Skog och brukbar jord tas i anspråk för att skapa städer vilket resulterar i ökade emissioner av växthusgaser (Getter & Rowe 2006; Getter m. fl. 2009; Post & Kwon 2000). Idag har problematiken kring urbanisering synliggjorts och det finns flertalet projekt runt om i världen för att lösa problemen med emissioner av växthusgaser till följd av detta (Bulkeley m. fl. 2011). En av lösningarna är att ta vara på alla takytor som finns. Takträdgårdar har vuxit fram tillsammans med extensiva gröna tak, vilket är takbeksädda med tunna mattor av sedumväxter. Vegetationen är torktålig och utgörs av olika fetblads- och fetknoppsväxter (Durhman 2006). Extensiva tak beträds vanligen inte och kan ha större lutning än tak där trädgårdar anläggs. De gröna taken ger en vacker vy från kringliggande byggnader och har många fördelar utöver rekreation. Exempelvis har de förmågan att lagra in kol, isolera byggnaden, temperaturutjämna, luftrena, ta hand om dagvatten, bullerdämpa och dessutom utgör de habitat för insekter och växter (Durhman m. fl. 2006; Söderblom 1992).

Runt om i världen är gröna tak en uppgående trend, där man sett alla dess positiva egenskaper som löser många problem till följd av urbaniseringen. (VanWoert m. fl. 2005). Även i Sverige har gröna tak börjat växa fram. En bakomliggande orsak kan vara att Sverige har 16 miljö kvalitetsmål som ska uppnås till år 2020. Bland dessa finns mål som begränsad klimatpåverkan och god bebyggd miljö. Miljömålen är uppsatta för att nå en hållbar utveckling (Naturvårdsverket 2014). Riksdagens definition av dessa två mål citeras nedan.

Begränsad klimatpåverkan:

”Halten av växthusgaser i atmosfären ska i enlighet med FN:s ramkonvention för klimatförändringar stabiliseras på en nivå som innebär att människans påverkan på klimatsystemet inte blir farlig.

Målet ska uppnås på ett sådant sätt och i en sådan takt att den biologiska mångfalden bevaras, livsmedelsproduktionen säkerställs och andra mål för hållbar utveckling inte

äventyras. Sverige har tillsammans med andra länder ett ansvar för att det globala målet kan uppnås.”

(Naturvårdsverket 2014)

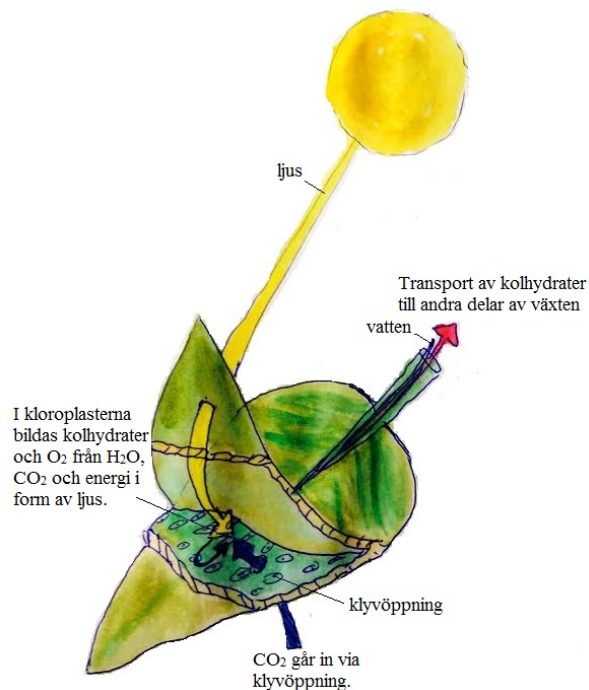
God bebyggd miljö:

”Städer, tätorter och annan bebyggd miljö ska utgöra en god och hälsosam livsmiljö samt medverka till en god regional och global miljö. Natur- och kulturvärden ska tas till vara och utvecklas. Byggnader och anläggningar ska lokaliseras och utformas på ett miljöanpassat sätt och så att en långsiktigt god hushållning med mark, vatten och andra resurser främjas.”

(Naturvårdsverket 2014)

1.1 Fotosyntes

För att få en förståelse för hur sedumtak kan fungera som en kolsänka är det viktigt att känna till den bakomliggande processen fotosyntes. Det är processen då kloroplasten i gröna växters blad binder in koldioxid från atmosfären och omvandlar det till adenosintrifosfat (ATP) (energi). Inuti kloroplasten i tylakoidmembranet sitter ett protein som innehåller klorofyllmolekyler som absorberar ljusenergi i form av fotoner. Energin skickas vidare till ett reaktionscentrum i form av elektroner (Sadava m. fl. 2010).



Figur 1. Fotosyntes och flöden i en växt (omarbetad från Carlsson 2014).

Dessa elektroner genererar inflödet av protoner från utsidan av tylakoidmembranet, kallad stroma, in i tylakoiden. Protonen skickas genom diffusion tillbaka ut till stroman genom ATP-syntas och katalyserar därigenom produktionen av ATP. ATP används sedan tillsammans med koldioxid som binds in i Calvin-cykeln för att bilda glukos och biprodukten syrgas (Reece m. fl. 2011). Figur 1 visar en schematisk bild över fotosyntesen i en växt.

Sedumväxter är främst CAM-växter, där CAM står för Crassulacea Acid Metabolism. Det innebär att klyvöppningarna öppnas på natten för att minska transpirationen och på så vis minimera vattenförlusten. CAM-växter lagrar in koldioxid under natten med hjälp av en reaktion som bildar en organisk syra. När det sedan blir ljus igen kan den inlagrade koldioxiden frigöras och användas i Calvin-cykeln (Reece m. fl. 2011). Många sedumarter kan skifta mellan CAM och C3 fotosyntes (att växten öppnar klyvöppningarna på dagen och binder in koldioxid) beroende på vattentillgång och ljusintensitet (Durhman m. fl. 2006).

En större växt har högre kolupptag vilket beror på bladegenskaper och rotutbredning. Begränsande faktorer för tillväxten är kväve och vatten. Koldioxid är ingen begränsande faktor för att omrörningen i atmosfären anses vara så effektiv att koldioxidbrist inte uppstår (Eckersten m. fl. 2004).

Fotosyntesen påverkas av solinstrålning, markfuktighet, luftfuktighet och temperatur. En växt lagrar in kol genom upptag av koldioxid under fotosyntesprocessen.

sen, men respirerar även koldioxid vid tillväxt och underhåll och avger då kol. Skillnaden mellan det kol som lagras in och det som respireras kallas nettofotosyntes och vid god vatten-, ljus- och näringstillgång är förutsättningarna för nettoinlagringen större än netto-kolförlusten, men nettofotosyntesen beror också på tillväxtstadium och ålder på växten. Vid förhållanden med sämre ljustillgång kan respirationen vara större än assimilering av kol (Eckersten m. fl. 2004).

Respiration och fotosyntes stimuleras av ökad temperatur. Temperaturökning vid låga temperaturer ger ökad fotosyntes jämfört med respiration vid samma temperaturökning. Vid hög temperatur svarar däremot respirationen starkast på en temperaturhöjning, medan fotosyntesen kan avta (Eckersten m. fl. 2004).

Uppstår vattenbrist kommer transpirationen att minska och klyvöppningarna att slutas. Detta leder till att kolupptaget hämmas. Allokeringen av kol i växten påverkas också av vattenbrist. Den inlagrade kolen som är avsatt för skotttillväxt kommer vid vattenbrist att omallokeras till rötterna. Det beror på att rötterna behöver öka sin andel för att möjliggöra ökat vattenupptag i marken. När nederbörden faller ansamlas vatten på växtens blad och andelen klyvöppningar i direktkontakt med atmosfärisk luft minskar. Detta medför att transpiration och kolupptag hämmas. Intensiteten på nederbörden har olika stor effekt på hur mycket vatten som stannar på bladen. Måttligt regn medför mer vatten som ansamlas på bladen medan vatten från häftiga skurar främst når markytan. Rötternas vattenupptag är starkt bundet till markvattenpotentialen, vilket beskriver hur mycket vatten som finns i marken. Är marken måttligt upptorkad (högre vattenpotentialer) hindras inte vattenupptaget speciellt mycket men vid låg vattenpotential hämmas vattenupptaget mycket, vilket leder till låg transpiration och minskat kolupptag (Eckersten m. fl. 2004).

1.2 Nettofotosyntes av kol i sedumtak

Nettofotosyntes från sedumväxter/sedumtak kan beräknas från ljusresponskurvor. Gröna tak kan vara extensiva, semi-intensiva och intensiva tak (Scandinavian Green Roof Institute 2014). Skillnaden mellan dessa är främst substratdjupet. Extensiva har ett substratdjup på 30 – 150 mm, semi-intensiva har ett djup på 120 – 250 mm och intensiva har ett djup på 200 – 2000 mm. Extensiva tak har vanligen sedum, örter, mossor medan semi-intensiva har sedum, gräs, örter, buskar och intensiva kan ha gräsmatta, buskar, träd. Tyngden av substratet och växterna skiljer sig även från extensiva med en vikt på 50 – 150 kg m⁻² till semi-intensiva med en vikt på 120 – 250 kg m⁻² och intensiva med en vikt på 200 kg m⁻² och uppåt (Scandinavian Green Roof Institute 2014). I denna uppsats undersöks extensiva

gröna tak bestående av sedumarter och med en tjocklek på 30 mm samt en täckningsgrad på 100 %, vilket innebär att hela mattan täcks av vegetation.

I Sverige finns de flesta sedumtaken i Malmö (Scandinavian Green Roof Institute 2014). Utbredningen av gröna tak i Malmö stad är ca 700 - 750 stycken och då främst på byggnader med tak på 40 – 80 m². Det ger en uppskattad yta på 42 000 m² (700 tak x 60 kvm). Den totala estimerade takytan i Malmö stad är på 13 miljoner m² (utifrån Malmö stads bottenarea). Det innebär att 0,014 procent nyttjas till gröna tak vilket innebär att det finns stora möjligheter till att expandera detta, då extensiva gröna tak går att anlägga på tak med 2-27° lutning.

De flesta studier som utförts på sedumtak är i förhållande till vattenkvalité och minskad temperatur i urbana miljöer (Getter & Rowe 2006). Studierna visar att sedumtak minskar temperaturen i urbana miljöer samt tar hand om dagvatten och ökar kvaliteten på vattnet. Andra studier som gjorts på gröna tak är kvantifiering av koldioxidupptag, både enskilt och i relation till hur mycket koldioxid landskap på marknivå binder in. Studierna om koldioxidupptag visar att sedumtak inte binder in lika mycket koldioxid som på marknivå, vilket beror på att substratdjupet är större på marknivå, och att andelen kol som lagras är liten i förhållande till andra landskap (Whittinghill m. fl. 2014). Getter m. fl. (2009) uppskattade att extensiva gröna tak kan lagra in 375 g C m⁻² under två års tid. Studien påvisar även vilka andra sätt som sedumtak bidrar till minskad koldioxid i atmosfären. Genom att vegetationsmattorna isolerar byggnader och därigenom minskar energiåtgången vid uppvärmning och avkylning i byggnader. Enligt Getter m. fl. (2009) skulle denna energibesparing kunna översättas till att sedumtak kolinlagrar 637 -719 g C m⁻² år⁻¹ i elkonsumtion och 65- 266 g C m⁻² år⁻¹ i naturgas. En annan studie som också visar på sedumtaks direkta och indirekta effekt att minska koldioxidutsläppen till atmosfären är Li & Babcock (2014), som visade att sedumtak har en förmåga att lagra mellan 73 - 276 g C m⁻² år⁻¹. Studien visade även att sedumtak bidrar till långsiktiga ekonomiska vinster i form av minskad energiförbrukning för uppvärmning och avkylning (Li & Babcock 2014).

1.3 Syftet

Syftet med denna studie är att bedöma om extensiva sedumtak kan bidra till minskad klimatpåverkan genom koldioxidupptag. Ytterligare syfte är att analysera hur lufttemperatur och substratets fuktighet påverkar koldioxidutbytet vid olika ljusnivåer. Sedumtaks potentiella årliga koldioxidupptag skattas från ljusresponsfunktioner som baseras på koldioxidutbytesmätningar av sedumtak i klimatkamrar.

2 Metod och material

I denna studie kommer gröna tak att syfta på extensiva tak bestående av sedumarter växande på jordmattor med en täckningsgrad på 100 %.

Arterna som förekommer på de undersökta mattorna är anpassade för det skandinaviska klimatet och ska tåla att artificiell bevattning inte utförs. I tabell 1 står de latinska och svenska namn på de sedumarter som förekommer i provtagningsmattorna.

Tabell 1. Latinska och svenska namn på sedumarter

Latinska namnet	Svenska namnet
Sedum acre	Gul fetknopp
Sedum ewersii	Mongoliskt fetblad
Sedum album	Vit fetknopp
Sedum album "Lime"	Vit fetknopp "Lime"
Sedum album "murale"	Vit fetknopp "murale"
Sedum album "coral carpet"	Vit fetknopp "coral carpet"
Sedum kamtschaticum	Kamtjatkafetblad
Sedum floriferum	Smaragdfetblad
Sedum spurium	Kaukasiskt fetblad
Sedum pulchellum	Skuggfetknopp
Sedum sexangulare	Kantig fetknopp
Sedum hybridum	Sibiriskt fetblad

2.1 Utförande

Sedummattorna i denna studie har en tjocklek på ca 30 mm och en stark fiberduk med Xeroflorstomme i botten som har en tjocklek på ca 3 mm (Veg Tech 2014).

Koldioxidutbytet mättes på sedummattor som placerades i tio stycken blomlådor med måttet 50x30 cm.

Sedummattorna placerades i klimatkamrar. Under det laborativa momentet, vilket bestod av 21 dagar, var klimatkamrarna inställda på en luftfuktighet på 65 procent och en ljusintensitet på 100 procent ($427 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$) mellan klockan 6.00 -22.00. Ljusintensiteten ändrades manuellt under själva mätningarna.

Koldioxidutbytet på mattorna mättes vid tre olika vattenhalter (fältkapacitet, medeltorrt och torrt), tre olika ljusintensiteter (100, 50 och 0 procent av maximal ljusintensitet (ca $427 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$), och tre olika temperaturer (10 °C, 15 °C och 25 °C) i klimatkammaren (Tabell 2). Sedummattorna mättes för varje nivå av vattenhalt under 3 dagar, för att sedan göra ett uppehåll på 4 dagar för att mattorna skulle torka upp.

Vid första mätserien som utfördes i klimatkamrarna bevattnades sedummattorna till fältkapacitet (25 vol%). Under första dagen mättes koldioxidutbytet vid den lägsta lufttemperaturen. När första mätningarna var färdiga ställdes temperaturen om till 15 °C för att växterna skulle anpassa sig inför nästkommande mätningar vid den temperaturen. När mätningarna på 15 °C var färdigställd, som följde föregående procedur, ändrades temperaturen om till 25 °C och de slutliga mätningarna utfördes. Därefter fick sedummattorna stå i några dagar för att vattenmängden skulle minska. Tre omgångar med mätningar utfördes enligt beskrivningen ovan.

Det gjordes även ett försök utomhus, för att bedöma hur koldioxidupptaget påverkades av högre ljusintensiteter. Sedummattorna placerades på en högt belägen balkong på Mark-Vatten-Miljöcentrum på Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.

Tabell 2. Mätningsschema innehållande vattenmättnad och temperatur, där 20 är antalet upprepningar och 3 är antalet ljusintensiteter, vilka var i medelvärde $427 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $217 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$ och $0 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$

	Temperatur		
Vattenmättnad	10 °C	15 °C	25 °C
Fältkapacitet (25 vol%)	20x3	20x3	20x3
Medeltorrt (11 vol%)	20x3	20x3	20x3
Torrt (6 vol%)	20x3	20x3	20x3

2.2 Material för mätningar

Mätsystemet som användes för att mäta koldioxidutbytet mellan sedummattorna och atmosfären bestod av en transparent kammare kopplat till en koldioxidanalysator (CPY-4, med en EGM-4, PPsystems, UK). Kammaren, med volymen 0,002 m³ (höjd 0,12 m, area 0,017 m²), var försedd med sensorer som mäter fotosyntetiskt aktiv strålning (PAR) och lufttemperatur. Kammaren hade en inbyggd fläkt för omrörning av luften. Under en mätning cirkulerar luften mellan kammaren och koldioxidanalysatorn genom slangar. Mättiden kan varieras, men i denna studie gjordes en mätning på 80 sekunder. Vattenhalten i sedummattorna mättes med en vattenhaltsmätare (Thetaprobe, Delta-T, UK).



Foto 2. Mätinstrumentet CPY-4 och provytorna med sedumarter (foto: Taylor.S 2014).

Beräkningar av koldioxidutbyte

Insamlad data sammanställdes och kvalitetsgranskades i Excel. Beräkningar av koldioxidutbyte gjordes i 3 steg. Först bestämdes koncentrationsförändringar, sedan koldioxidflödet, slutligen togs ljusresponskurvor fram. Sedumtaks potentiella årliga kolinlagring skattades från ljusresponsfunktionerna och skalades upp till ett årsvärde med klimatdata över lufttemperatur och fotosyntetiskt aktiv strålning (PAR) från Uppsala år 2013.

2.2.1 Koncentrationsförändringen

Koncentrationsförändringen (k) av koldioxid (dC ; ppm) per tidsenhet (dt ; s) i kyvetten beräknades med hjälp av linjär funktion efter att avlägsnat de första 10 sekunderna eftersom dessa värden inte blivit stabila.

$$k = \frac{dC}{dt} \quad (\text{ekvation 1})$$

2.2.2 Koldioxidflödet

Koldioxidflödet (F ; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) beräknades sedan utifrån gasernas allmänna tillståndsekvation enligt ekvation 2,

$$F = \frac{p \cdot V}{R \cdot T_a} \cdot \frac{k}{A} \quad (\text{ekvation 2})$$

där p är lufttrycket (Pa), V är volymen på kammaren ($0,002 \text{ m}^3$), R är universella gaskonstanten ($8,3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T_a är lufttemperaturen (K), k är koncentrationsförändringen av koldioxid i kammaren per tidsenhet (ppm/sekund, ekvation 1), och A är den area av sedummattan som kammaren omfattar ($0,017 \text{ m}^2$).

2.2.3 Ljusresponskurvor

Ljusresponskurvorna verkställdes genom utomhusmätningar och mätningar på labb i klimatkamrar. Utomhusmätningarna utfördes för att kunna uppskatta när ljusmättnad uppstod, det vill säga den ljusnivå då koldioxidflödet når sin maximala nivå och planar ut. Mätningarna i klimatkamrarna faller inom den linjära delen av ljusresponskurvorna.

$$F_{\text{Lin}} = \alpha x - r \quad (\text{ekvation 3})$$

där F_{Lin} är koldioxidflödet ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$) för den linjära beskrivningen av ljusresponsen, x är ljusintensitet (PAR-strålning $\mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$), r är respiration ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$) och α är hur mycket koldioxidflödet tas upp per enhet ljusintensitet.

En logaritmisk regression anpassades till utomhusmätningarna för att bestämma vid vilken nivå ljusmättnaden uppstod och koldioxidflödet planar ut. Erhållen funktion efter regression enligt ekvation 4.

$$F_{\text{Log}} = c - a \cdot e^{(-b \cdot x)} \quad (\text{ekvation 4})$$

där F_{Log} är koldioxidflödet ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$) för den logaritmiska beskrivningen av ljusresponsen, x är ljusintensitet (PAR, $\mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a är upptaget när ljusintensiteten är $0 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$, b är hur fort koldioxidutbytet sker i takt med att ljusintensiteten ökar och c är det maximala koldioxidupptaget.

En kvadratisk funktion (ekvation 5) användes för att bedöma den totala respirationen från sedummattorna. Genom att studera sambandet mellan lufttemperaturen och koldioxidutbytet i mörker ($0 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

$$F_r = gT_a^2 \cdot lT_a \cdot r_0 \quad (\text{ekvation 5})$$

där F_r är koldioxidflödet ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), T_a är lufttemperaturen ($^{\circ}\text{C}$), r_0 är basrespirationen (respirationen vid 0°C) och g och l är variabler över hur fort koldioxidflödet ökar med temperaturen.

2.2.4 Koldioxidflödet på årsbasis

De framtagna ljusresponskurvorna användes för att beräkna koldioxidupptaget på årsbasis. De användes även för att beräkna ut kolinlagringen under vegetationssäsongen. Vegetationssäsongen börjar när medeldygns temperaturen överstiger 5°C i minst fyra dagar och slutar när temperaturen inte längre är över 5°C i fyra dagar i sträck (Odin m. fl. 1983). Som drivdata för beräkning av koldioxidupptaget på årsbasis användes klimatdata för Uppsala år 2013, för vegetationssäsongen användes samma klimatdata men endast data mellan 15 april till 17 oktober. Data bestod av lufttemperatur, ljusintensitet, fotosyntetiskt aktiv strålning (PAR) för varje timme. PAR-data hämtades från SMHI (SMHI 2014) och temperaturdata från SLUs klimatstation på Ultuna (SLU 2014).

Följande antaganden gjordes för beräkningarna

- Eftersom det var små skillnader mellan ljusresponskurvorna för olika fuktighetsklasser (figur 2) användes en linjär funktion (ekvation 3) som var oberoende av fuktighetsklass (tabell 3) för ljusintensiteter upp till $447 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- Koldioxidupptaget nådde sitt maximum och planade ut vid en ljusintensitet på $447 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (figur 5). I beräkningarna antogs värdet vara konstant efter denna ljusintensitet.
- För temperatur $<0^{\circ}\text{C}$ antogs att ingen fotosyntes förekom och att respirationen var densamma som vid 0°C (ekvation 5 och r -värdet i figur 4).
- För temperaturer $>0^{\circ}\text{C}$ antogs respirationen (r -värdet i ekvation 3) ändras med temperaturen enligt figur 4.
- k -värdet (i ekvation 3) togs från tabell 3 där 10 , 15 och 25°C antogs representera temperatur intervallerna 0 - $12,5^{\circ}\text{C}$, $12,5$ - 20°C respektive $>20^{\circ}\text{C}$.

2.3 Sedumarternas och substratets kolinnehåll

I denna studie mättes även kolinnehållet i växterna och i jordsubstratet för att få en förståelse för vart kolet lagras in. Detta utfördes efter 7 veckor och inte i samband

med mätningarna. Torrsubstansen fastställdes genom att prover torkades i minst 6 timmar i ett torkskåp på 105 °C, för att avlägsna det vatten som är bundet i växterna och jorden. De 20 deglarna innehållande växterna torkades under 15 timmar. Kolmängden i växterna skattades med växternas torrsubstansfaktor (ekvation 6).

Uträkning av torrsubstans

$$f_{ts} = \frac{m_s}{m_s + m_w} = \frac{ts}{ls} = \frac{\text{mängd torkat prov}}{\text{mängd lufttorrt prov}} \quad (\text{ekvation 6})$$

Där f_{ts} är torrsubstansfaktor, m_s är massa substans, m_w massa fukt, t_s är torrsubstans och l_s är lufttorrt substans. För vidare beräkning till kolmängd antogs en kolhalt på 50 % i växtsubstratet.

Första steget i laborationen var att klippa av sedumarterna från jordsubstratet där koldioxiduppmätningen utförts på sedummattorna. Arealen var på 0,017 m² och alla växtdelar från den ytan placerades i en redan invägd degel. Jordproverna samlades in från samma area som växtdelarna. All jord från hela arean på 0,017 m² samt på djupet (30 mm) separerades från sedummattan och placerades i en behållare. I behållaren mortlades jorden och rötterna för att få en mer homogen blandning och ett representativt prov på fem gram flyttades till en invägd degel. När 20 prover färdigställts placerades de i ett torkskåp på 105 °C i 6 timmar för att bestämma torrsubstansfaktorn.

Därefter utfördes en glödning på proverna. Proverna placerades i en laboratorieugn i 500 °C under 5 timmar för att allt organiskt material skulle oxidera till koldioxid och vatten. Efter glödningen fick proverna stå i en exsickator och svalna och därefter vägdes prov samt degel.

3 Resultat

3.1 Sedummattornas kolinnehåll

Torrvikten på växterna uppskattades till 278 g m^{-2} (i medelvärde) innan torkning, vilket gav en kolmängd på 139 g m^{-2} i medelvärde för växtsubstratet med ett medelfel på 6 g m^{-2} . Kolhalten på växtsubstratet antogs vara 50 % och för jordsubstratet beräknades kolhalten till 3,4 % med ett medfel på 0,8 %.

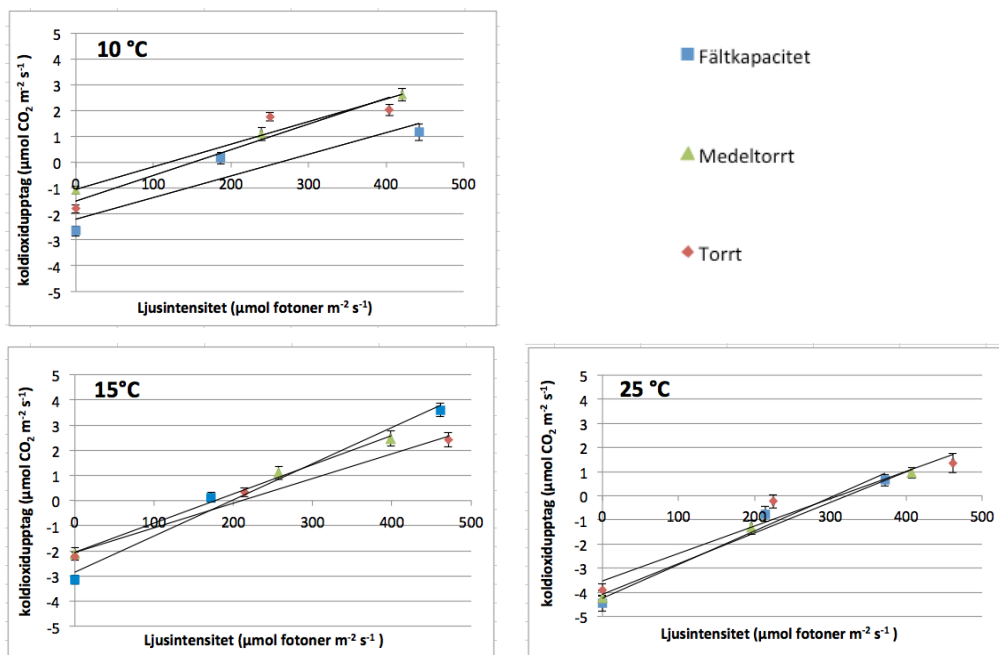
3.2 Lufttemperaturens och markfuktighetens inverkan på koldioxidupptaget

Substratets fuktighet (vol%) mättes för varje temperatur; 10, 15 och 25 °C, vid tre olika fuktighetsmättnader; fältkapacitet, medeltorrt och torrt. Medelvärdet på fuktighetsmättnaden för fältkapacitet var 25 vol%, medeltorrt 11 vol% respektive för torrt 6 vol% (tabell 3).

Tabell 3. Mätningar av substratets fuktighet (vol%) för de dagar som koldioxidmätningarna utfördes vid tre olika fuktighetsmättnader; fältkapacitet, medeltorrt och torrt. Mellan varje fuktighetsklass fick sedummattorna torka upp i fyra dagar.

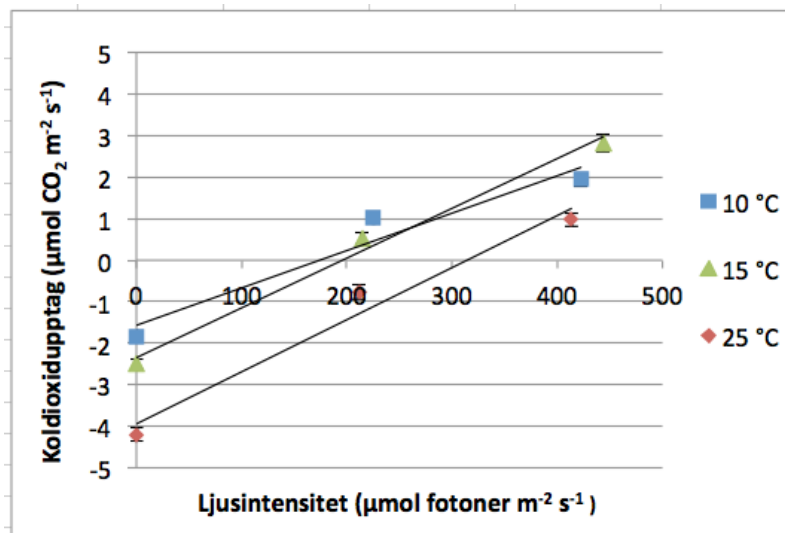
Mätserie			
Fuktighetsmättnad (vol%)	10 °C	15 °C	25 °C
Fältkapacitet	29	27	20
Medeltorrt	11	10	13
Torrt	9	2	8

Koldioxidupptaget ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) för samtliga temperaturer vid tre fuktighetsmättnader; fältkapacitet, medeltorr och torrt, ökade med ljusintensiteten (figur 2). Upptaget visade samma trend vid samtliga nivåer av fuktighet utom för fältkapacitet vid 10 °C, där upptaget var marginellt lägre både vid en ljusintensitet på 0 och vid 442 $\mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.



Figur 2. Ljusresponskurvor för koldioxidupptag vid 10 °C, 15 °C och 25 °C vid tre olika fuktighetsmättnad; fältkapacitet, medeltorr och torrt. Varje punkt är ett medelvärde och felstaplarna visar ett medelfel (n=20).

Det var inte en markant skillnad mellan olika fuktighetsnivåer för de olika temperaturerna och därför upprättades funktioner för koldioxidupptaget ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) där alla fuktighetsklasser ingick. Högst koldioxidupptag vid 100 % ljusintensitet (medelvärde på 427 $\mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) skedde vid 15 °C med ett upptag på 2,8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Därefter låg koldioxidupptaget på 1,9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ vid 10 °C och lägst koldioxidupptag var det vid 25 °C med ett medelvärde på 1,0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

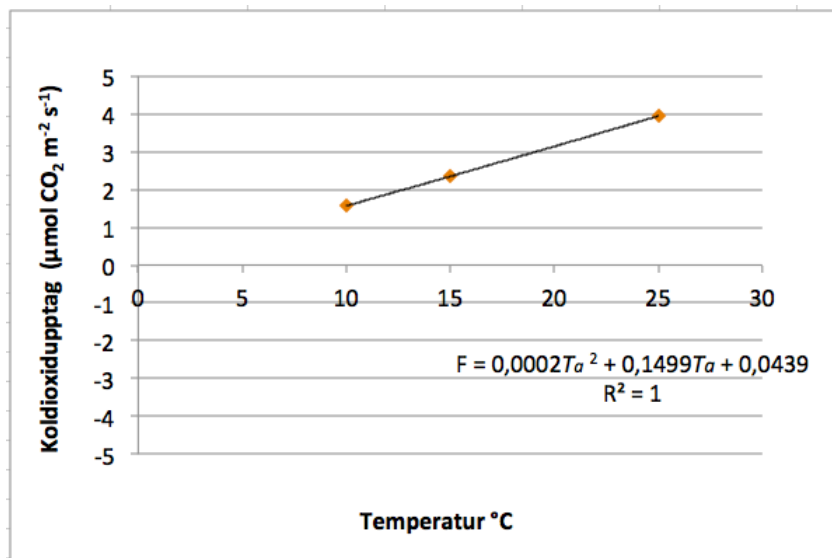


Figur 3. Ljusresponskurva med koldioxidupptag vid temperaturerna 10 °C, 15 °C och 25 °C där alla fuktighetsklasser ingår. Varje punkt är ett medelvärde och felstaplarna visar ett medelfel (n=20).

Tabell 4. Värdena för olika parametrar till linjära funktionerna i figur 3 för respektive temperatur. Där α är koldioxidupptagsändringen per tidsenhet, r är koldioxidupptaget vid 0 ljusintensitet och R^2 är determinationskoefficienten.

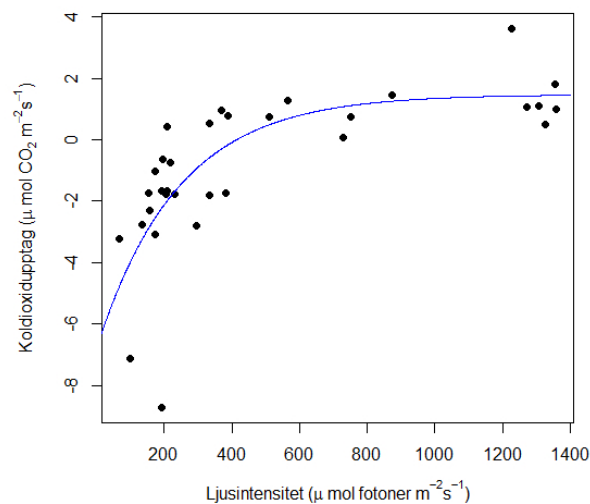
T (°C)	α	r	R^2
10	0,090	1,57	0,94
15	0,0120	2,35	0,99
25	0,0125	3,94	0,97

Det fanns ett tydligt samband mellan lufttemperaturen och koldioxidutbytet i mörker ($0 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$) som motsvarar den totala respirationen från sedum-mattorna. Denna respiration fördubblades vid en temperaturökning på tio grader (figur 4). Basrespirationen, det vill säga respirationen vid 0°C , uppskattades till $0,04 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ med ekvation 5 i figur 4.



Figur 4. Sambandet mellan temperatur och respiration när PAR var noll.

I labb var den maximala ljusintensitet $427 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$ och för att bedöma vart maximum låg gjordes en ljusresponskurva av utomhusmätningarna. För att genomföra detta gjordes en logaritmisk regression över sedumarternas koldioxidflöde som visar att ljusmättnad uppstod vid en ljusintensitet på $447 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Det innebär att växternas koldioxidupptag planade ut och uppnådde ett maxvärde på $0,19 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ vid ljusmättnad (Figur 5). Variablerna, enligt ekvation 4, var $-8,28$ för a (koldioxidupptaget när ljusintensiteten är $0 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $0,004$ för b (hur fort koldioxidutbytet sker i takt med att ljusintensiteten ökar) och $1,47$ för c (det maximala koldioxidupptaget).



Figur 5. Ljusresponskurva för koldioxidupptag från utomhusmätningar där ljusnivån gick upp till $1400 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Varje punkt är en individuell mätning. Ljusmättnad uppstod vid en ljusintensitet på $447 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

3.3 Sedumtaks potentiella kolinlagring på årsbasis

Uppskattningen av kolinlagringen på årsbasis visar på att sedumtak har potentialen att lagra in $45 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ beräknat utifrån klimatdata för Uppsala år 2013. För vegetationssäsongen (15 april till 17 oktober) var mängden 42 g C m^{-2} .

4 Diskussion

Den här studien visar att sedumtak kan lagra in 45 g C m^{-2} på årsbasis i ett klimat motsvarande Uppsalas. Under vegetationssäsongen uppgår mängden till 42 g C m^{-2} . Jämfört med Getter m. fl. (2009) är denna mängd mindre då deras studie visade ett medelvärde på $188 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ (375 g C m^{-2} på en tvåårsperiod). Det är flertalet faktorer som kan förklara varför mängden skiljer sig mellan studierna. Getter m. fl. (2009) utförde mätningarna i ett annat klimat (East Lansing i Michigan), det fanns en årsvariation, mätningarna utfördes på ett äldre sedumtak och metoden att mäta kolinlagringen skiljde sig från denna studie genom invägning och torkning av växt- och jordsubstrat för uppskattningen av koluttaget. .

Antagandenas inverkan kolinlagringen på årsbasis

Antaganden för beräkningarna av årskolinlagringen gjorda i denna studie har påverkat resultatet.

Ett antagande som gjordes är att respirationen för temperaturer under $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ var densamma som respiration vid $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ enligt figur 4. Värdet för respirationen uppskattades till $0,04 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (r-värdet i figur 4) genom att anpassa respirationen (det vill säga koldioxidutbytet då PAR är 0) till en kvadratisk funktion (Figur 4). Ett annat antagande är att r-värdet för temperatur över $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ändrades efter figur 4. Dessa antaganden är gjorda för att respirationen varierar med temperaturen. Om r-värdet från tabell 3 hade använts för de tre olika temperaturintervallerna hade respirationen överskattats.

Den beräknade årliga kolinlagringen kan också påverkats av antagande som gjorts i avseende av koldioxidutbytet ljusberoende (α -värde i ekvation 3) för olika temperaturer. Dels har antagandet gjorts att α -värdet för 10 , 15 och $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (tabell 3) representerar tre olika temperaturintervaller 0 - $12,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $12,5$ - $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ respektive $>20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vilket kan inverka på resultatet då intervallerna är breda. För ett mer exakt resultat hade det varit bra att minska intervallen och göra fler mätningar vid lägre temperaturer som 0 - $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ett annat antagande som gjordes var att de skattade funktionerna för sambandet mellan koldioxidflöde och ljusintensitet antogs vara linjära upp till en ljusintensitet på $447 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ med stöd av figur 5. Mätningarna i klimatkamrarna uppgick inte till en ljusnivå över $447 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ utan uppskattningen av vilken ljusintensitet som koldioxidflödet planade ut på baserades på mätningar som utfördes utomhus. Detta gjordes då på färre provytor för att få ett referensvärde (Figur 5), men även vid ett senare datum (22 september 2014). Detta är en mätning som gäller för den specifika dagen och dess klimat samt för vegetationens ålder och fennologiska status. Vidare studier skulle behövas för att undersöka hur dessa värden kan generaliseras mellan olika perioder under året. Trots att färre mätningar gjorts för högre ljusintensiteter, är det skattade koldioxidupptaget förmodligen mindre osäkert än om en linjär funktion skulle använts fullt ut. Med en linjär funktion skulle koldioxidupptaget överskattas vid högre ljusintensiteter.

Vidare gjordes antagandet att substratets fuktighet och således nederbörd inte är en avgörande faktor för koldioxidupptaget. Det gjordes med stöd av figur 2 som visade att funktionerna inte påverkades markant av substratets fuktighet. Med det antagandet uteslöts den aspekten och funktioner med enbart temperatur som variabel användes.

Lufttemperaturens inverkan på koldioxidupptaget

Enligt figur 3 skiljer sig inte koldioxidupptagets ljusberoende markant från varandra vid de olika temperaturerna för klimatdata från Uppsala år 2013. Största skillnaden är det mellan 15 och 25 °C med en mellanskillnad på $1,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Detta kan bero på att sedumarterna kan ha skiftat från C3 till CAM fotosyntes vid 25 °C vilket innebär att koldioxidupptaget främst sker under natten (mörker) (Durhman m. fl. 2006). En annan förklaring kan vara att vid högre temperatur stänger växterna sina klyvöppningar för att minska evaporation från bladen vilket medför att koldioxidupptaget minskar (Eckersten m. fl. 2004).

Det är också viktigt att belysa relevansen av vilken klimatdata som används. År 2013 var temperaturen relativt låg och jämn hela sommaren och resten av året. Däremot kan år 2014, som var ett extremt år med många dagar över 30 °C, ha stor inverkan på kolinlagringen. Tre dygn med över 30 °C innebär en sänkning av kolinlagringen till $38 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ från $45 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$. Det beror på att vid ökad temperatur ökar respirationen och då minskar mängden kol som lagras in.

Markfuktighetens inverkan på koldioxidupptaget

Denna studie visar att substratets fuktighet och således nederbörd inte är en avgörande faktor för koldioxidupptaget (figur 2). Enligt tabell 3 skiljer sig vattenmängd-

den från varandra inom samma fuktighetsklass vilket kan vara orsaken till att sambandet mellan substratets fuktighet och koldioxidupptaget inte uppmättes. Det hade varit bra om fuktighetsklasserna var mer kontrollerade och haft samma värde vid de tre olika temperaturmätningarna per fuktighetsklass. Att vattentillgängligheten inte hade någon inverkan på upptaget kan bero på att studien gjordes på sedumväxter. De är tåliga växter som kan skifta från C3 till CAM fotosyntes vid låg vattentillgänglighet och då fortsätta fotosyntetisera även om vattentillgången är låg (Durham m. fl. 2006). Enligt Wolf & Lundholms (2008) studie om vattenupptaget i gröna taks mikrokosmos och påverkan på växtarter och vattentillgång har sedumarter förmågan att minska avdunstningen från markytan och därigenom fördröja vattenavgången vid ökad temperatur (Wolf & Lundholm 2008). Detta kan vara en orsak till att sedummattorna i den här studien inte uppvisade stora skillnader i koldioxidupptag vid olika fuktighetsklasser.

Kan sedumtak bidra till minskad klimatpåverkan?

Denna studie visar att sedumtak bidrar till minskad klimatpåverkan genom dess förmåga att lagra in kol. Sedumtak minskar även energiförbrukning i byggnader, utgör rekreation i form av vackrare stadslandskap, tar hand om dagvatten och temperaturutjämnar.

Förslag till vidare forskning

Det skulle vara intressant att utveckla denna studie och inkludera andra aspekter som kan påverka den slutliga mängden kol som lagras in. En av dessa aspekter är hur mycket koldioxid som släpps ut vid montering och transport av sedumtak. En annan aspekt att inkludera är sedumtaks förmåga att minska invändig energiåtgång i byggnader genom att isolera taket. Enligt Getter m. fl. (2009) motsvarar denna isolering en energibesparing som är jämförbar med att sedumtak kolinlagrar 637 - 719 g C m⁻² i elkonsumtion och 65- 266 g C m⁻² i naturgas per år. Detta innebär att sedumtak har en potentiellt högre kolinlagringsförmåga sett till både direkt och indirekt kolinlagring än vad denna studie visar. Även Li & Babcock (2014) har konstaterat att sedumtak har stor potential att inlagra kol sett till både direkt och indirekt förmåga att binda in kol. Li & Babcock (2014) studie visade att sett till miljövärden är det möjligt att spara 34 % i termer av kostnadsreduktion för samhället genom att anlägga sedumtak.

En annan aspekt är nederbörden. I denna studie har effekter av nederbörd indirekt tagits med genom att proverna bevattnats till fältkapacitet. Som nämnts i inledningen är nederbörd en av klimatfaktorerna som påverkar koldioxidupptaget dels genom klyvöppningars kontakt med atmosfären men också i form av tillgäng-

ligt vatten för växten i marken. Det skulle vara intressant att utveckla och vidare studera nederbördens effekter på koldioxidupptaget, än vad som var möjligt i denna studie, genom att till exempel undersöka om direkt nederbörd som ansamlas på bladen har en inverkan på koldioxidupptaget.

Ytterligare idéer till vidare forskning kan vara att mäta koldioxidutbytet vid lägre temperaturer än vad som var möjligt i denna studie och att mäta under olika perioder av året. Det kan påvisa om årsvariationer förekommer och om växtens olika faser under dessa perioder har en inverkan på koldioxidupptaget.

5 Slutsats

Studien visar att extensiva sedumtak bidrar till minskad klimatpåverkan genom koldioxidupptag. Vidare visar studien att växtsubstratets fuktighet inte är en betydande faktor för koldioxidupptaget och att den största skillnaden i upptag är det mellan temperaturen 15 och 25 °C. Den beräknade mängden inlagrat kol uppgår till 45 g C m⁻² år⁻¹. Mängden är i relation till tidigare studier om kolinlagring mindre men i urbana miljöer kan sedumtak vara en bra lösning eftersom de nyttjar ytor där alternativen tegel-, plåt- och papptak har ett obefintligt nettoupptag vilket visar sedumtaks potential att minska växthusgaser i urbana miljöer.

Referenslista

- Björn, L. O. (2014). Svenska. [Elektronisk] I: *Nationalencyklopedin*. Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/fotosyntes> [2014-05-15]
- Eckersten, H., Gärdenäs, A. & Lewan, E. (2004). *Biogeofysiken – en introduktion*. Uppsala: Emergo.
- Durhman, A.K., Rowe D.B. & Rugh C.L. (2006). Effect of watering regimen on chlorophyll fluorescence and growth of selected green roof plant taxa. *Hortscience*, vol. 41(7), ss. 1623-1628.
- Getter, K.L. & Rowe D.B. (2006). The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. *Hortscience*, vol. 41(5), ss. 1276-1285.
- Getter, K.L., Rowe D.B., Robertson, G.P., Gregg, B.M. & Andresen, J.A. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roof. *Environmental Science & Technology*, vol. 43(19), ss. 7564-7570.
- Li, Y. & Babcock, R.W. Jr. (2014). Green roofs against pollution and climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 34(4), ss. 695-705.
- Naturvårdsverket (2014). *Miljömålsportalen*. <http://www.miljomal.se/sv/Miljomalen/> [2014-04-14]
- Odin, H., Eriksson, B. & Perttu, K. (1983). *Temperaturkartor för Svenskt skogsbruk*. Rapporter i skogsekologi och skoglig marklära. Institution för skoglig marklära. SLU.
- Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, vol. 6, ss. 317-328.
- Sadava, D., Hillis, D.M., Heller, H.C. & Berenbaum, M.R. (2010). *Life: The Science of Biology*. 9.ed. Sunderland: Sinauer Associates Inc.
- Scandinavian Green Roof Institute (2014). Personlig kontakt Jonatan Malmberg

- SMHI (2014). STRÅNG data (över fotosyntetisk aktiv strålning för år 2013) från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut i samarbete med Strålsäkerhetsmyndigheten och Naturvårdsverket. <http://strang.smhi.se/extraction/index.php> [2014-05-20]
- SLU (2014). *Ultuna klimatdata*. Personlig kontakt Per Nyman
- Söderblom, P. (1992). *Sedumtak- lätta gröna tak av sedumväxter*. Värnamo; Fälth's Tryckeri AB.
- Carlsson, C. (2014). Svenska. [Elektronisk] I: *Nationalencyklopedin*. Tillgänglig: <http://www.ne.se/fotosyntes> [2014-07-10]
- Bulkeley, H., Castán Broto, V., Armstrong, A., Maassen, A. & Milledge, T. (2011). *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements*. London: UN-Habitat (UN-Habitat Rapport, 2011)
- Veg Tech AB (2014). *Sedumarter olika arter och sorter*. <http://www.vegtech.se/grona-tak---gardar/sedumtak---grona-tak/> [2014-04-14]
- VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Fernandez, T. & Xioa, L. (2005). Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth. *Journal of Environmental Quality*, vol. 34, ss. 1036-1044.
- Whittinghill, L.J., Rowe, D.B., Schutzki R. & Cregg, B.M. (2014). Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. *Landscape and Urban Planning*, vol. 123, ss. 41-48.
- Wolf, D. & Lundholm, T.J (2008). Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering*, vol. 33(2), ss. 179-186.